XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/95

Estudo Mecânico da Adição de Lodo de ETA e Cinza de Caldeira em Solo para uso em Barreiras Minerais

Ingrid Leticia Andrusczak
Discente do Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, 22012721@uepg.com.br

Maitê Milléo Almeida
Discente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, maitemilleo12@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus
Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Carlos Emmanuel Lautenschläger
Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

RESUMO: Nos processos de tratamento convencional da água para torná-la potável, é gerado um material semissólido, denominado Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA). Este material é classificado como resíduo, cuja forma de descarte adequada ocorre em aterros sanitários. A natureza do lodo de ETA dificulta seu emprego em aplicações de engenharia, de forma que pesquisas vêm sendo desenvolvidas para estudar formas de reutilizar esse material e reduzir a sobrecarga em aterros sanitários. Além do lodo, os aterros sanitários podem receber diariamente outros tipos de resíduos, como cinzas de processos industriais. Nesta pesquisa foram estudadas composições de lodos de ETA e cinza volante com solo, buscando soluções de engenharia com aproveitamento destes materiais em camadas de fundo e cobertura de barreiras minerais, componentes do sistema de isolamento em aterros sanitários. Para uma aplicação viável no contexto em estudo, uma das características que as misturas devem apresentar é uma resistência ao cisalhamento adequada aos esforços decorrentes do alteamento do aterro. Para essa análise mecânica, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica dos materiais, bem como ensaio de cisalhamento direto, a fim de conhecer suas características e sua resistência, avaliando a viabilidade técnica para a aplicação proposta. Os resultados indicaram que as misturas contendo lodo e cinza volante apresentaram bons resultados, destacando-se a mistura com 80% de solo, 10% de lodo e 10% de cinza, que apresentou o melhor desempenho mecânico.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de Estação de Tratamento de Água, Cinza Volante de Caldeira, Ensaio de Caracterização, Cisalhamento Direto.

ABSTRACT: In conventional water treatment processes to make it potable, a semi-solid material is generated, called Water Treatment Plant Sludge (WTPS). This material is classified as waste, and its proper disposal method occurs in sanitary landfills. The nature of WTP sludge hinders its use in engineering applications, so research is being developed to study ways to reuse this material and reduce the burden on landfills. In addition to sludge, landfills can receive other types of waste daily, such as ash from industrial processes. In this research, compositions of WTP sludge and fly ash with soil were studied, seeking engineering solutions with the utilization of these materials in bottom and cover layers of mineral barriers, which are components of landfill containment systems. For a viable application in the context under study, one of the characteristics that the mixtures must present is a shear strength adequate to the stresses resulting from the landfill lifting. For this mechanical analysis, geotechnical characterization tests of the materials were performed, as well as direct shear tests, to know their characteristics and strength, evaluating technical feasibility for the proposed application. The results indicated that the mixtures containing sludge and fly ash showed good results, highlighting the mixture with 80% soil, 10% sludge, and 10% ash, which presented the best mechanical performance.

KEYWORDS: Water Treatment Plant Sludge, Boiler Fly Ash, Characterization Test, Direct Shear.

1 INTRODUÇÃO

Para que a água seja considerada potável, ela precisa atender aos padrões de qualidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que trata do processo de controle e vigilância da qualidade da água para consumo. O tratamento é realizado em Estações de Tratamento de Água (ETA) e depois distribuída à população pelas companhias de saneamento. O processo de tratamento de água mais utilizado é o Convencional (de ciclo completo), que possui os processos de aeração, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (Florençano, 2011). No processo de decantação o material mais denso, conhecido como lodo, sedimenta até o fundo do decantador, onde posteriormente é retirado e descartado.

A destinação correta dos lodos de estação de tratamento de água (LETA) é o aterro sanitário, mas muitas vezes este material é descartado incorretamente em corpos hídricos. Pensando em formas de evitar o descarte incorreto e a ocupação de grandes volumes em aterros sanitários, pesquisas buscam formas de reutilizar este material, bem como muitos outros resíduos descartados, como é o caso da cinza volante de caldeira. As cinzas volantes de caldeira são produzidas diariamente através da queima de carvão mineral para produção de energia, sendo as usinas termoelétricas uma das principais indústrias geradoras desse material, utilizando, em sua maior parte, madeira na queima para combustão, devido a disponibilidade e custo desse material (Bobato e Borges, 2023).

Muitos estudos buscam formas de utilizar esses materiais na construção civil, como é o caso do estudo de Ruviaro et al. (2020) e Vasconcelos *et al*. (2004), que estudaram a utilização de lodo como material cimentício e cinza volante em argamassas e misturas asfálticas, respectivamente. Também são amplamente utilizados na geotecnia, em mistura com solos, como nos estudos de Fiedler (2023) e Almeida (2024) que incorporaram lodo em solo para utilização em barreiras minerais. Dessa forma, o presente estudo fundamenta-se nas pesquisas dessas autoras, propondo a incorporação do lodo em solo com a adicão de cinza volante de caldeira para uso em barreiras minerais, como os próprios aterros sanitários no qual ambos são descartados.

2 Materiais e métodos

O solo utilizado nesta pesquisa é proveniente do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG), localizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) em Ponta Grossa (PR). O lodo foi coletado na estação de tratamento de água da SANEPAR em Iraí – Curitiba (PR). A cinza volante foi produzida e coletada pela empresa Cargill. As amostras foram armazenadas em tambores e levadas até o laboratório para serem utilizadas nas pesquisas.

Baseando-se em pesquisas anteriores com a incorporação de lodo em solo, visando uma melhor avaliação da influência da cinza volante, o lodo foi fixado em uma adição de 10% nas misturas, em relação à massa seca total, variando a porcentagem de cinza em 5, 10 e 15%. Para bom desempenho da análise foram consideradas misturas com e sem a adição de lodo, como também misturas de solo-lodo e análise de cada componente separadamente.

Foram realizados ensaios de caracterização das amostras de solo, lodo, cinza e das misturas de solo-cinza e solo-lodo-cinza, para os diferentes teores em estudo. Os ensaios realizados para conhecer as características dos materias foram: a determinação do teor de umidade (conforme a norma da ABNT NBR 6457/2024), o peso específico real dos grãos (conforme a DNER-ME 093/1994), a granulometria (conforme a norma da ABNT NBR 7181/2025), os Limites de Atterberg (limite de liquidez - conforme a norma da ABNT NBR 6459/2025 e limite de plasticidade – conforme a norma da ABNT NBR 7180/2025) e a compactação (conforme a ABNT NBR 7182/2025).

Após a obtenção das características dos materiais e das misturas, foram realizados ensaios de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resitência das amostras. Os ensaios foram realizados na condição saturada utilizando o equipamento MS100 – Cisalhamento Automático, da marca Owntec, sob três níveis de tensão normal: 50, 100 e 200 kPa, para obtenção da envoltória de resistência indicativa do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo representativo de cada condição estudada.

3 Resultados

Primeiramente as amostras foram preparadas seguindo a NBR 6457/2024, na qual o solo foi seco ao ar livre e destorroado a fim do material ficar com sua umidade natural e sem torrões. As amostras de lodo e cinza foram utilizadas *in natura*.

O primeiro ensaio de caracterização realizado foi o teor de umidade na condição natural, onde o solo apresentou 2%, a cinza 6,2% e o lodo utilizado para a caracterização apresentou valores entre 305,47% e 342,87%. Segundo a análise granulométrica realizada por Bloinski *et al.* (2020), o solo pertencente o Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) foi classificado como uma argila areno-siltosa com baixa plasticidade pela análise granulométrica e pelo método SUCS como um silte de baixa plasticidade. O lodo, em sua forma natural, foi classificado como um silte orgânico (OH) e a cinza volante com sua maior porcentagem de areia, após o peneiramento grosso e fino. Os dados completos da caracterização dos materiais constam na Tabela 1.

Os ensaios de caracterização das amostras confirmam a alta plasticidade do lodo e baixa plasticidade do solo, assim como a baixa plasticidade da cinza. Também pode ser observado que a cinza é um material de baixa densidade, levando as amostras que possuem maior porcentagem de cinza a um peso específico real dos grãos com menores valores, sendo o solo seguido do lodo os materiais mais densos.

Tabela 1. Caracterização das amostras de solo, lodo, solo-lodo, solo-cinza e solo-lodo-cinza.

Amostras			Peso esp. real dos grãos (gf/cm³)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Peso específico aparente seco (γ_d) (gf/cm³)	Umidade Ótima (%)
Solo	Lodo	Cinza						
100%	0%	0%	2,669	37	-	NP	1,498	24,55
0%	0%	100%	1,159	-	-	NP	-	-
95%	0%	5%	2,695	36	31	5	1,365	27,70
90%	0%	10%	2,639	39	34	5	1,033	32,00
85%	0%	15%	2,343	38	-	NP	1,222	35,90
0%	100%	0%	2,051	487	392	95	-	-
90%	10%	0%	2,566	34	-	NP	1,079	46,30
85%	10%	5%	2,331	43	39	4	1,0325	35,00
80%	10%	10%	2,054	47	41	6	1,119	40,00
75%	10%	15%	1,993	52	-	NP	1,200	37,30

Devido ao excesso de vazios da amostra de cinza e característica semissólida do lodo, não foi possível realizar o ensaio de compactação com essas amostras. Dessa forma, para a moldagem dos demais corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento direto, foi adotada como referência a umidade ótima da mistura de solo-lodo já estudada pelo grupo em estudos anteriores, conforme determinado por Almeida (2024).

Por fim, realizou-se o ensaio de cisalhamento direto com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras estudadas. Os ensaios foram realizados com as amostras na condição inundada, permitindo o preenchimento dos vazios da amostra, visando diminuir eventuais efeitos de sucção que poderiam interferir na análise dos resultados. Os parâmetros de resistência analisados foram definidos pelo critério de Mohr-Coulomb através do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno resultante da construção das envoltórias de resistância, obtidos através do gráfico de tensão normal versus tensão cisalhante. Os gráficos podem ser observados nas Figuras 1, 2 e 3, bem como os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito na Tabela 2.

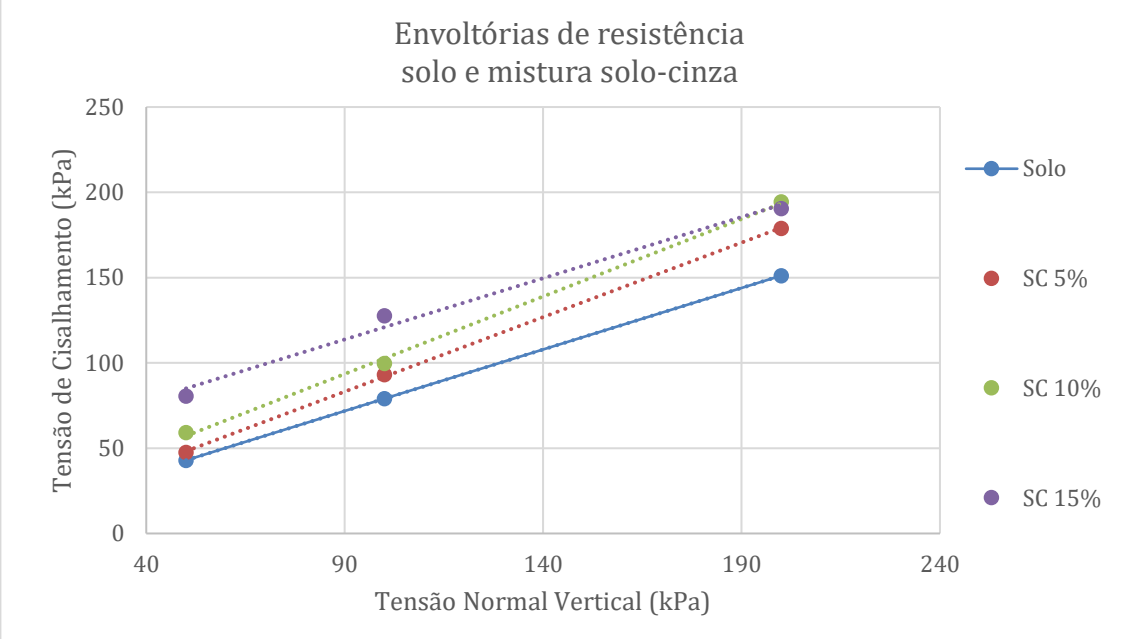


Figura 1. Tensão normal x tensão cisalhante das amostras de solo e solo-cinza.

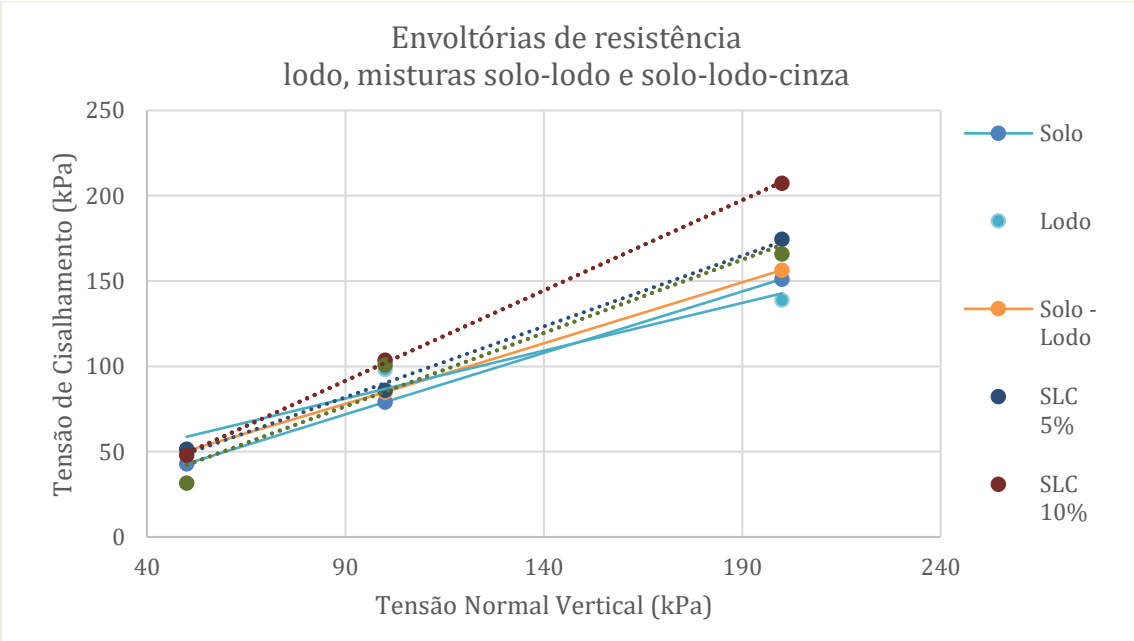


Figura 2. Tensão normal x tensão cisalhante das amostras de solo, lodo, solo-lodo e solo-lodo-cinza.

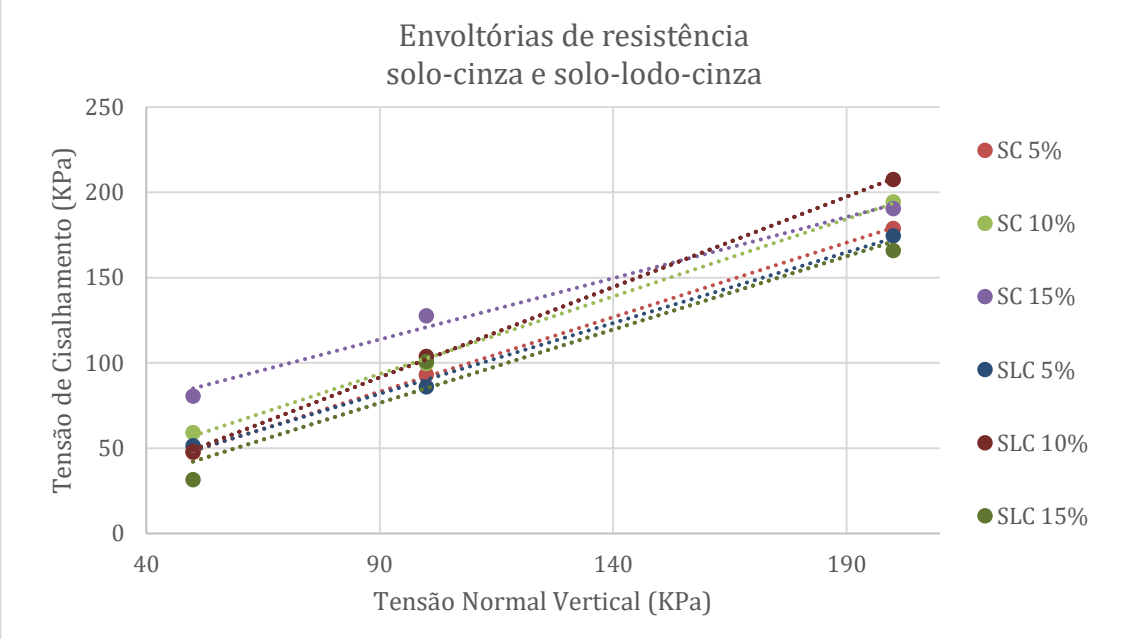


Figura 3. Tensão normal x tensão cisalhanete das amostras de solo-cinza e solo-lodo-cinza.

Para melhor visualização os gráficos foram divididos em gráfico do solo e solo-cinza (Figura 1), gráfico de solo, lodo, solo-lodo e solo-lodo-cinza (Figura 2) e solo-cinza e solo-lodo-cinza (Figura 3). Devido às carcterísticas das cinza no estado puro, que dificultam a compactação e o controle do peso específico em relação a um valor objetivo, não foi possível realizar o ensaio com corpos de prova compostos apenas de cinza.

Na Tabela 2 podem ser observados os valores de intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito das amostras (ϕ), onde as porcentagens apresentadas são referentes a amostra de cinza, o lodo fixado em 10% e o solo apresentando a diferença desses valores.

Tabela 2. Parâmetros de resistência das amostras de solo, lodo, solo-lodo, solo-cinza e solo-lodo-cinza.

Amostra			Coesão	Ângulo de atrito
Solo	Lodo	Cinza	(KPa)	(º)
100%	0%	0%	6,85	35,8
0%	100%	0%	30,69	29,3
90%	10%	0%	14,7	35,3
95%	0%	5%	4,56	41,1
90%	0%	10%	32,38	40,4
85%	0%	15%	49,11	35,7
85%	10%	5%	7,25	39,7
80%	10%	10%	0	45,9
75%	10%	15%	0	40,5

Com as curvas dos gráficos e resultados dos parâmetros de resistência das amostras, pode ser observado que as amostras de solo incorporadas com lodo de ETA e cinza volante apresentaram bom desempenho de resistência, com valores de ângulo de atrito interno maiores que as amostras com 100% de solo e 100% de lodo.

As misturas de solo que contém os teores de 5% e 10% de cinza tiveram resultados mais satisfatórios que a mistura com 15% de cinza, já as misturas que contém teores de lodo e cinza, tiveram melhores resultados com os maiores teores de cinza, sendo a amostra com 80% de solo, 10% de lodo e 10% de cinza a amostra com o melhor resultado de todos os ensaios. Com isso, pode ser observado que a adição conjunta do lodo e da cinza exige proporções específicas para o melhor desempenho das misturas.

Observou-se ainda que algumas misturas apresentaram intercepto coesivo próximo de zero, sendo as amostras com presença de lodo e maior porcentagem de cinza as amostras com este resultado. Esse comportamento indica que estas amostras apresentam menores resistências sob baixos níveis de confinamento, quando comparado com outras amostras em estudo.

Além disso, os resultados mostram que, mesmo apresentando elevada umidade e plasticidade, a incorporação do lodo em solo não comprometeu o desempenho mecânico das misturas quando utilizado em proporções reduzidas, assim como a volumetria da cinza volante. Dessa forma, os resultados indicam que a combinação entre solo, lodo de ETA e cinza volante pode contribuir para melhorar o comportamento mecânico do material, ao mesmo tempo em que possibilita o aproveitamento de resíduos que normalmente seriam descartados.

4 Conclusão

As misturas de solo-lodo-cinza apresentaram resultados satisfatórios, melhorando a resistência do solo, sendo viável a utilização das misturas. A amostra de solo-lodo-cinza, com 80% de solo, 10% de lodo e 10% de cinza, apresentou a maior resistência das amostras analisadas, com ângulo de atrito de 45,95°. A amostra não possui valor de intercepto coesivo, assim como a amostra de solo-lodo-cinza com 15% de cinza, ou seja, as amostras não apresentaram resistência antes da aplicação de tensões. Como o material resiste principalmente ao atrito entre as partículas, ele tende a apresentar maior resistência quando submetido a maiores tensões normais.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o uso de lodo de ETA e cinza volante incorporados em solo é uma alternativa tecnicamente viável para utilização em barreiras minerais, pois além da contribuição mecânica e geotécnica, há também a contribuição para uma destinação mais adequada desses resíduos, reduzindo seu volume em aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

A equipe agradece à Fundação Araucária pela bolsa de estudos e incentivo à realização de pesquisas científicas, à SANEPAR pela disponibilização do lodo de ETA, à Cargill pela disponibilização da cinza volante, bem como a Universidade Estadual de Ponta Grossa, por abrir portas e oferecer oportunidades aos estudantes. Os autores agradecem também à equipe de Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da UEPG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solo -Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Almeida, M. M. (2024) *Incorporação de lodo de estação de tratamento de água em solo reforçado com geossintéticos: influência nas propriedades mecânicas e hidráulicas.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, 103 p.

Bloinski, M. H. Q.; Tonus, B. P. A.; Lautenschlager, C. E. R.; Olavo, L. H. F.; Faro, V. P. (2020) Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG): classificação do solo local e parâmetros de resistência ao cisalhamento. In: COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. ABMS. v. 1, p. 01-08.

Bobato, G. T.; Borges, M. (2023). *Avaliação da viabilidade técnica da utilização de cinza de caldeira em misturas de solo-cimento para aplicações em construção civil.* Ponta Grossa, PR, Paraná.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 093: *Solos - Determinação do peso específico real dos grãos*. Rio de Janeiro.

Florençano, J. C. (2011) *Saneamento básico: sistemas de tratamento e distribuição de água.* São Paulo, SP, 118 p.

Ruviaro, A. S.; Silvestro, L.; Scolaro, T. P.; Pelisser, F.; Gleize, P. J. P. (2020). *Incorporação do lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar.* Porto Alegre, RS, Rio Grande do Sul.

Vasconcelos, C. B; Leal, C. L. D.; França, M. P.; Castro, P. F. (2004). *Aproveitamento da cinza de caldeira na construção civil*. Campos dos Goytacazes, RJ, Rio de Janeiro.

FIEDLER, D. T. (2023) *Análise da incorporação do lodo de uma estação de tratamento de água (ETA em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, 89 p.

OWNTEC Soluções em Engenharia Ltda. MS 102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO (2024). *Manual de instruções.* Santa Cruz do Sul: Owntec.